Методика определения оптимального подхода к численному моделированию течений в прибрежных лагунах для экологических приложений

Technique of determination of the best approach to computer simulation of currents in coastal lagoons for ecological applications

Дикий / Dikii D.
Дмитрий Игоревич
(dimandikiy@mail.ru)
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»,
инженер кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем.
г. Санкт-Петербург

Соколов / Sokolov A.
Андрей Николаевич
(AnSokolov@kantiana.ru)
кандидат технических наук.
ФГБУН «Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН», старший научный сотрудник,
г. Москва.

Чубаренко / Chubarenko B.
Борис Валентинович
(chuboris@mail.ru)
кандидат физико-математических наук.
ФГБУН «Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН», ведущий научный сотрудник.
г. Москва

Артемьева / Artemyeva V.
Виктория Денисовна
(vika_med2019@mail.ru)
ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», студент.
г. Калининград

Ключевые слова: численное моделирование – computer simulation; течения – currents; волнение – waves; комбинированные sigma-z координаты – combined sigma-z coordinates; Вислинский залив – Vistula Lagoon; Балтийское море – the Baltic Sea.

В работе рассмотрены подходы к численному моделированию течений в водоеме лагунного типа на примере Вислинского залива Балтийского моря. На основе конечно-элементной аппроксимации расчетной области при постоянных ветрах различной силы были сравнены результаты моделирований в двумерной и трехмерной постановке с учетом и без учета ветрового волнения. Трехмерная модель без учета волнения оказалась наиболее оптимальной по времени счета и точности.

This work describes approaches to computer simulation of currents in the lagoon-type water body such as the Vistula Lagoon(Kaliningradskiy-Vislinskiy Zaliv) of the Baltic Sea. Based on the finite element approximation of the computational domain, the results of simulation in 2D and 3D approaches (with constant winds of different strength) have been compared with and without regard to wind waves. The 3D model without regard to wind waves has been proved the optimal solution in terms of computation time and accuracy.

Введение

Прибрежные лагуны являются продуктивными прибрежными водоемами. Основной особенностью динамики их биогеохимических характеристик является прямая зависимость от гидродинамических факторов [3]. Такие водоемы считаются в значительной степени уязвимыми с точки зрения антропогенного воздействия, природных явлений, в частности, изменения климата в будущем [4]; для многих направлений экономического развития состояние их вод имеет определяющее значение [5].

Для анализа возможности прибрежных водоемов пропускать/задерживать загрязнения, а также оценки чувствительности таких водоемов к воздействию человека используются различные временные масштабы: время задержки (residence time), время обновления вод или проточности (water renewal time or flushing time), возраст вод (age) и т.д. Например, время обновления вод [6–8] определяется как отношение массы примеси к скорости ее вымывания и описывает время, необходимое для замещения старой воды, находившейся в лагуне на новую, пришедшую либо с речным

2 2018.indd 117 04.07.2018 14:25:56

стоком (пресная вода), либо поступившую из моря (с соленостью прилегающей морской акватории).

Оценка временных масштабов может быть произведена различными методами, среди которых одним из наиболее эффективных является математическое моделирование, в рамках которого изучается поведение консервативной примеси при расчетных полях течений в лагуне. Так, время обновления вод можно оценить по результатам расчета уменьшения концентрации консервативной примеси, заполняющей водоем в начальный момент времени [8, 9]. Для маркирования отдельных частей водоема задаются примеси разной «окраски». В итоге получается набор двумерных полей для времен обновления для различных начальных моментов времени [10,11].

Следует учитывать, что характерные временные масштабы, даже для небольших лагун, могут составлять от нескольких месяцев до нескольких лет [3]. Поэтому выбор модели расчета течений оптимальной сложности, которая, с одной стороны, максимально точно учитывала бы физику процесса, а с другой – требовала бы минимального времени счета, является чрезвычайно важным.

Целью работы является выбор оптимального с точки зрения точности и скорости счета подхода для расчета течений в прибрежной лагуне для их дальнейшего использования в экологических приложениях.

Задача решается на примере Вислинского (Калининградского) залива Балтийского моря (рис. 1). Являясь типичной береговой лагуной, залив расположен в юго-восточной части Балтики, он вытянут в направлении с юго-запада на северо-восток почти на 100 км. Ширина изменяется от 2 до 11 км, площадь водной поверхности 838 км². Береговая линия имеет протяженность 270 км. Глубина залива в среднем составляет 2,7 м, максимальная, без учета Калининградского судоходного канала, – около 5,2 м [12]. Калининградский судоходный канал проходит в северной части залива и соединяет порт Калининград (устье реки Преголи) с Балтийским проливом. Глубина и ширина судоходного канала составляют около 10 и 100 м соответственно.

Описание методики

Первоначальным этапом работы является определение статических параметров модели, зависящих от объекта моделирования. В данном случае речь идет о Вислинском заливе. В качестве инструмента математического моделирования использовалось программное обеспечение Coupled Model FM DHI Software на неструктурированной конечно-элементной сетке. Расчетная область (рис. 1) охватывает Вислинский (Калининградский) залив) с устьем реки Преголи и Балтийским проливом (входом в Калининградский

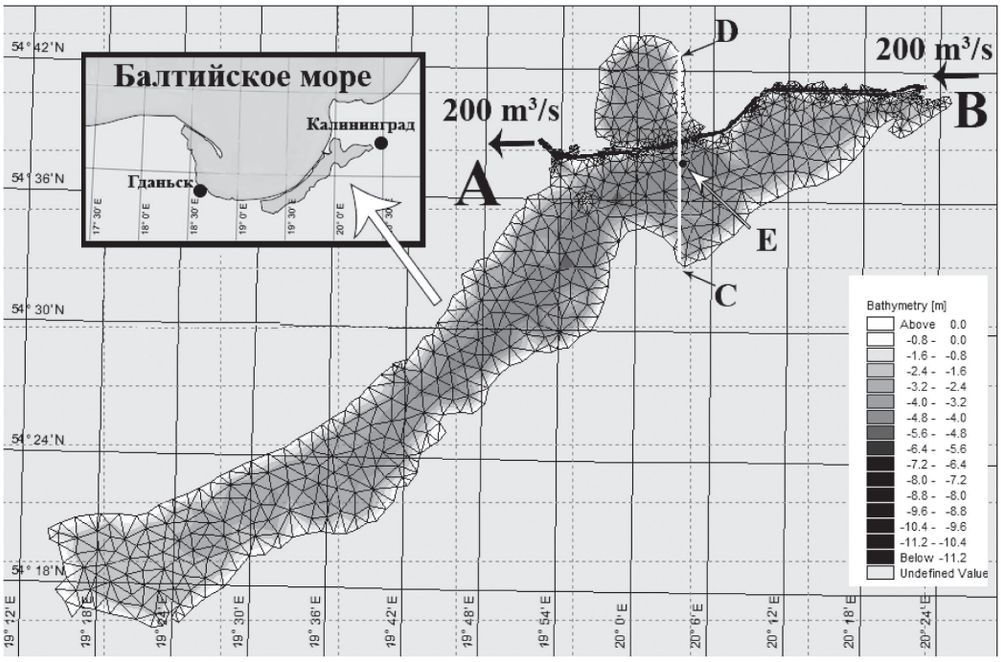

Рис. 1. Положение Вислинского (Калининградского) залива и расчетная область с полем глубин.
A – выход в Балтийское море через Балтийский пролив,
B – устье реки Преголи.
C-D – профиль, вдоль которого производился анализ скоростей течений и волнения (т. E)

2 2018.indd 118 04.07.2018 14:25:56

судоходный морской канал), соединяющим залив с Балтийским морем. Ниже представлены основные параметры модели.

Протяженность прямоугольника, в который вписывается расчетная область, составляет около 80 км с запада на восток, а с севера на юг – приблизительно 50 км. В области Калининградского морского канала, соединяющего устье реки Преголи с Балтийским морем, расчетная сетка сгущается, и характерные размеры сторон ячеек составляют примерно 100 м. Для участков, далеко отстоящих от канала, размер стороны ячейки составляет порядка 1,5 км, чем достигается сравнительно небольшое время счета в сочетании с необходимой детализацией. Крупномасштабные батиметрические данные были взяты из [13], а детальная батиметрия акватории залива вблизи канала – из общедоступного источника[1].

Расчетная область имеет две открытых границы: выход в Балтийское море через Балтийский пролив и устье реки Преголи (обозначены А и В на рис. 1). Для проведенных оценочных расчетов предполагалось, что приток воды в залив через устье реки Преголи составляет 200 м^3/с (максимальный расход реки Преголи по средним многолетним данным [14]). Для равенства объема втекающей и вытекающей воды на внешней границе Балтийского пролива также задавался расход 200 м^3/с. Направление и скорость ветра над всей расчетной областью считались одинаковыми.

Используемый программный комплекс позволяет проектировать модели в двумерном и трехмерном пространствах, а также включает в себя несколько модулей, которые могут работать как автономно, так и в режиме динамического обмена данными (coupled mode). Исходя из этого, следующим этапом необходимо произвести моделирования при различных конфигурациях с целью дальнейшего анализа выходных данных.

Гидродинамический модуль основывается на использовании уравнений мелкой воды[2]. Результатом решения системы уравнений являются расчетные поля составляющих скоростей течений (направление и модуль скорости), а также значение возвышения уровня свободной поверхности. В случае двумерной постановки получаются осредненные по всей глубине значения скоростей, для трехмерного случая – течения, осредненные по толщине конкретного слоя. Спектральная волновая модель основывается на решении уравнения баланса плотности волнового действия[3].

Расчет течений проводился с учетом и без учета поверхностного ветрового волнения. Подобный подход был использован в [15] для морской прибрежной зоны со значительным перепадом глубин – от глубокой воды до мелководья. Было показано, что влияние ветрового волнения на течения является заметным лишь в узкой прибрежной полосе. В настоящем исследовании анализируется влияние ветрового волнения в условиях мелководной лагуны (на всей площади которой условия мелкой воды можно считать корректными). Задача расчета течений решалась в двумерной и трехмерной постановках. При трехмерном моделировании плотностная стратификация вод отсутствовала.

Для трехмерной постановки вся водная толща разделялась на слои по глубине, и был использован логарифмический закон изменения вертикальной турбулентной вязкости, который дал наиболее достоверные результаты для прибрежной зоны Юго-Восточной Балтики [16]. Использовалась модель с комбинированным разделением на вертикальные слои по sigma- и z-координатам (рис. 2). Так как в среднем глубина залива не превышает 5 м, а глубина морского судоходного канала около 10 м, то было принято решение верхний слой до 4 м глубиной представить в виде 12 sigma-слоев (количество слоев фиксировано, толщина слоя изменяется при изменении глубины), а пространство ниже 4 м там где такие глубины есть – в виде z-слоев: фиксированная толщина слоя (1 м), количество слоев изменяется при изменении глубины.

В настоящей работе рассматривается квазистационарная задача формирования поля течений под воздействием ветра с постоянной скоростью и направлением и постоянных расходах на открытых границах. Решение подобных задач в большинстве аналогичных моделей [1, 2, 17] основано на применении метода установления. Другими словами, решается нестационарная задача на некотором временном интервале, по окончанию которого сформировавшееся решение уже можно считать квазистационарным. Критерием того, что поля волнения и течений можно считать установившимися, является отсутствие значимых изменений значений рассчитываемых величин от времени.

На примере зависимости существенной высоты волны от времени, представленной на рис. 3, для точки Е при западном ветре со скоростью 20 м/с, было оценено время установления. Из графика следует, что уже после 8–12 часов моделирования, волнение можно

[1] Картографический интернет-ресурс Multimaps. URL:http://multimaps.ru/#x=54.631504&y=20.033894&z=13&t=depth (last call 12.11.2017).

[2] MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic module: Short description. 2017. DHI software, DHI Water and Environment, Horsholm, 14 pp. URL: https://www.mikepoweredbydhi.com/-/media/shared%20content/mike%20by%20dhi/ flyers%20and%20pdf/productdocumentation/short%20descriptions/mike213_fm_hd_short_description.pdf (last call 12.11.2017).

[3] MIKE 21 wave modelling with MIKE 21 SW (Spectral wave module FM): Short description. 2017b. DHI Software, DHI Water and Environment, Horsholm, 16 pp. URL: https://www.mikepoweredbydhi.com//media/shared%20content/mike%20by%20dhi/flyers%20and%20pdf/product-documentation/short%20descriptions/mike21_sw_fm_short_description.pdf (last call 12.11.2017).

2 2018.indd 119 04.07.2018 14:25:57

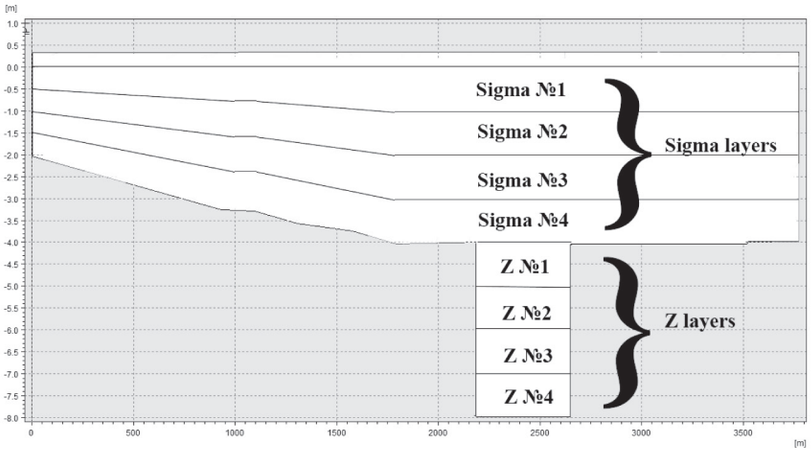

Рис. 2. Комбинированное распределение слоев по глубине: четыре sigma-слоя на глубине до 4 м и последующие z-слои с шагом 1 м

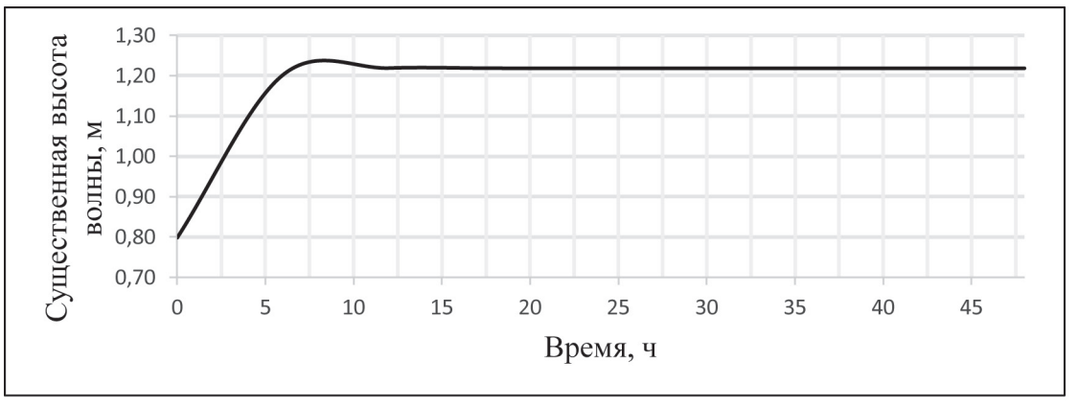

Рис. 3. Изменение существенной высоты волны от времени моделирования для западного ветра со скоростью 20 м/с (для точки E, рис. 1)

считать квазистационарным. По течениям ситуация аналогичная. При неизменном ветре и условиях на открытых границах менее чем через сутки после начала расчета течения можно считать установившимися.

В настоящем расчете использовался опорный шаг по времени равный 30 сек (в случае проблем со стабильностью, программный комплекс может автоматически уменьшать шаг).

Гидродинамический модуль, в трехмерной постановке, основывается на использовании уравнений мелкой воды:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=S \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial vu}{\partial y}+\frac{\partial wu}{\partial z}=fv-g\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \rho_a}{\partial x}+$$
$$+\frac{g}{\rho_0}\int_z^{\eta}\frac{\partial \rho}{\partial x}dz-\frac{1}{\rho_0 h}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)+F_u+\frac{\partial}{\partial z}\left(v_t\frac{\partial u}{\partial z}\right)+u_sS \qquad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial uv}{\partial x}+\frac{\partial wv}{\partial z}=$$
$$=-fu-g\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \rho_a}{\partial y}-\frac{g}{\rho_0}\int_z^{\eta}\frac{\partial \rho}{\partial y}dz-\frac{1}{\rho_0 h}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right)+$$
$$+F_v+\frac{\partial}{\partial z}\left(v_t\frac{\partial v}{\partial z}\right)+v_sS \qquad (3)$$

где t – время; x, y, z – Декартовы координаты; η – возвышение уровня свободной поверхности; d – глубина неподвижной воды; $h=\eta+d$ – итоговый уровень воды; u, v, w – компоненты скорости, соответственно, в направлениях x, y, z; f – сила Кориолиса; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность; S_{xx}, S_{yx}, S_{xy}, S_{yy} – компоненты тензора напряжения; v_t – вертикальная турбулентная вязкость; ρ_0 – масштаб плотности; p_a – атмосферное давление; S – величина расхода, создаваемая источниками; u_s, v_s – компоненты скорости истечения воды из источников. Слагаемые горизонтального напряжения

2 2018.indd 120 04.07.2018 14:25:57

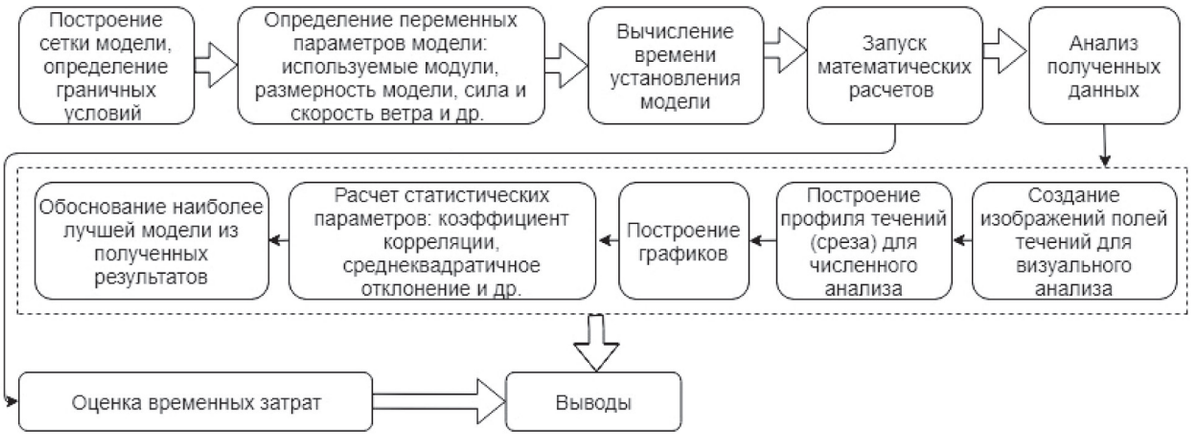

Рис. 4. Графическое представление методики определения оптимального подхода к расчету течений

F_u и F_v описываются отношением градиента напряжений через горизонтальную турбулентную вязкость.

Результатом решения системы уравнений являются расчетные поля составляющих скоростей течений по оси абсцисс (u) и ординат (v), а также значение возвышение уровня свободной поверхности $\eta(x,y)$. В случае двумерного моделирования получаются осредненные по всей глубине значения скоростей, для трехмерного случая – осредненные по толщине конкретного слоя.

Спектральная волновая модель основывается на решении уравнения баланса волновой плотности действия:

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}c_x N+\frac{\partial}{\partial y}c_y N+\frac{\partial}{\partial \omega}c_\omega N+\frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N=\frac{S}{\omega} \qquad (4)$$

здесь N – плотность действия; t – время; x, y – декартовы координаты; θ – направление распространения волны; ω – круговая частота волны; c_x, c_y – параметры распределения плотности в пространстве; c_ω – параметр изменения круговой частоты; c_θ – параметр рефракции волн.

Таким образом, предлагаемую методику можно представить в виде следующей блок-схемы (рис. 4). Элементы анализа данных и оценки временных затрат рассмотрены подробнее в следующем разделе.

Результаты и обсуждение

Моделирование производилось для двух направлений ветра, северного и западного. Для северного ветра скорость была установлена малой, 5 м/с, а для западного большой, 20 м/с. Выбор силы ветра связан с возможностью дальнейшего сравнения влияния этого фактора на результаты моделирования. Рассматривались четыре постановки задачи – двумерная (2D) и трехмерная (3D) гидродинамика без учета и с учетом поверхностного волнения.

На рис. 5 представлены в качестве примера результаты моделирования поля течений при западном ветре для четырех случаев: a) осредненные по глубине поля скоростей (2D постановка без учета ветрового волнения), b) поля скоростей в шестом sigma-слое без учета ветрового волнения, c) поля скоростей в шестом sigma-слое с учетом ветрового волнения, d) поля скоростей на поверхности с учетом ветрового волнения. Нумерация слоев в программном комплексе MIKE осуществляется сверху вниз. Самым верхним является первый sigma-слой. Поскольку sigma-слоев было всего 12, шестой sigma-слой находится примерно в средине «sigma-зоны», на горизонте примерно 2 метра от поверхности для глубоких частей залива (4 метра и глубже).

Из рисунка видно, что влияние ветрового волнения на поле течений ощущается только для верхних слоев при трехмерном моделировании и отчетливо прослеживается для ветра 20 м/с: происходит увеличение модулей скоростей течений и изменение их направлений. Однако уже на глубине 2 м это влияние практически незаметно и поля течений в большей степени схожи, что подтверждается рис. 5b и 5c. Сравнивая двумерную модель и шестой sigma-слой трехмерной модели, можно отметить, что поля течений при более внимательном рассмотрении отличаются, но структурно схожи, диапазон скоростей примерно совпадает, т.е. не наблюдается резкого отличия в модулях скорости.

Для более точного сравнения моделей было решено построить профиль абсолютных значений скорости течения вдоль линии, где разница скоростей была бы наиболее заметна. В качестве такой линии была выбран отрезок CD (рис. 1), захватывающий прибережную зону, участки со средней глубиной до 5 м и судоходный морской канал с глубиной до 10,5 м.

Построенные профили представлены на рис. 6. Видно, что при двумерной постановке задачи спектрально-волновой модуль существенно не влияет на формирование поля течений. Такая же ситуация

2 2018.indd 121 04.07.2018 14:25:58

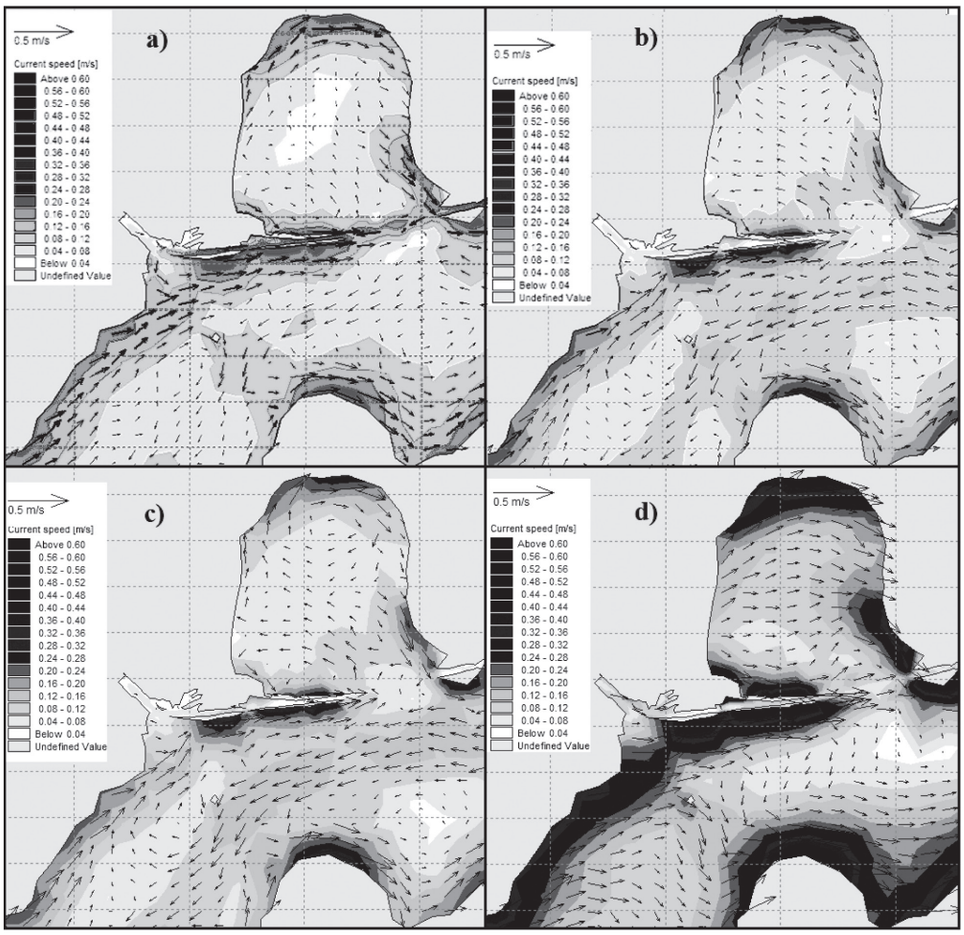

Рис. 5. Поля течений по результатам моделирования при западном ветре силой 20 м/с:
a) двумерная модель без волн; b) трехмерная модель без волн, 6-ой sigma-слой;
c) трехмерная модель с волнами, 6-ой sigma-слой;
d) трехмерная модель с волнами, 1-ый sigma-слой

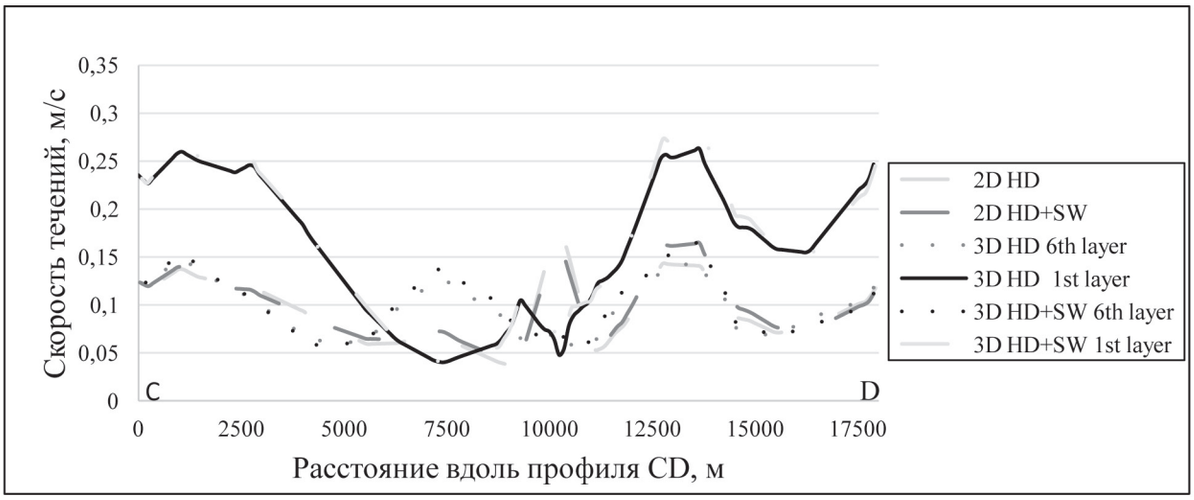

Рис. 6. Профиль абсолютного значения скорости течения при западном ветре со скоростью 20 м/с.
Обозначения 2D и 3D соответствуют пространственной размерности модели,
HD – наличие гидродинамического модуля, SW – наличие спектрально-волнового модуля;
1st – первый sigma-слой, 6th – шестой sigma-слой

2 2018.indd 122 04.07.2018 14:25:58

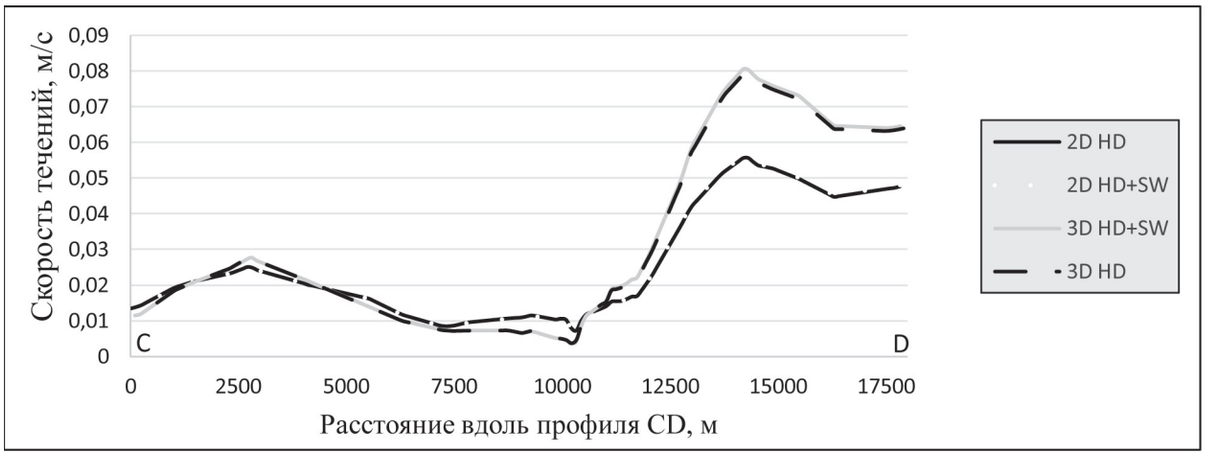

Рис. 7. Профиль модулей скоростей течений, осредненных по всей глубине, при северном ветре со скоростью 5 м/с, 2D и 3D соответствует размерности модели, HD – наличие гидродинамического модуля, SW – наличие спектрально-волнового модуля

Таблица 1

Оценка совпадения течений вдоль профиля CD при разных постановках задачи

Для результатов моделирования при западном ветре 20 м/с						
	2D HD	2D HD+SW	3D HD 1st layer	3D HD+SW 1st layer	3D HD 6th layer	3D HD+SW 6th layer
2D HD		0,98	0,65	0,68	0,47	0,40
2D HD+SW	1,38		0,71	0,75	0,57	0,52
3D HD 1st σ-layer	7,43	7,12		0,99	0,51	0,42
3D HD+SW 1st σ-layer	7,48	7,16	0,63		0,53	0,45
3D HD 6th σ-layer	4,22	3,85	7,98	8,14		0,98
3D HD+SW 6th σ-layer	4,71	4,26	8,05	8,19	0,91	

Для результатов моделирования при северном ветре 5 м/с				
	2D HD	2D HD+SW	3D HD	3D HD+SW
2D HD		0,99	0,99	0,99
2D HD+SW	1,01		0,99	0,99
3D HD*	3,95	3,94		0,99
3D HD+SW*	3,62	3,58	1,83	
*Осредненные по глубине данные				

HD – наличие гидродинамического модуля, SW – наличие спектрально-волнового модуля. Величины коэффициента корреляции и среднеквадратичного относительного отклонения (%) представлены выше и ниже главной диагонали соответственно

2 2018.indd 123 04.07.2018 14:25:58

Таблица 2

Оценка временных затрат на моделирование

Постановка задачи	2D HD	2D HD+SW	3D HD	3D HD+SW
Затрачиваемое время, у.е.	1	35	9	42

HD – наличие гидродинамического модуля,
SW – наличие спектрально-волнового модуля

происходит и при трехмерном моделировании, как на поверхности, так и в толще воды. Также, сравнивая двумерную и трехмерную модели (шестой и первый sigma-слои), можно заметить, что они дают несколько различные результаты. Отсюда следует вывод о том, что если в задаче важно знать вертикальную стратификацию течений (например, при моделировании перемещения нефтяных загрязнений, часть фракций которых распространяется по поверхности, а часть – осаждается в глубинные слои), то рациональней использовать трехмерную модель.

Для слабого ветра (5 м/с), как и следовало ожидать, влияние ветрового волнения еще менее заметно. Однако прослеживается различие в результатах 2D и 3D расчетов (рис. 7), где вдоль профиля CD сравниваются скорости для двумерного расчета и осредненные по всей толщине слоя воды скорости трехмерного расчета.

Все вышеперечисленные факты подтверждаются значениями коэффициента корреляции Пирсона и среднеквадратичного относительного отклонения (табл. 1).

Коэффициент корреляции между результатами двумерной и трехмерной моделями с осреднением скоростей по глубине при малых скоростях ветра (5 м/с) составляет 0,99–1,00. Этот факт свидетельствует о том, что для получения поля течения в условиях штиля достаточно использовать двумерную модель (без спектрально-волнового модуля). При увеличении скорости ветра корреляция между двумерной и трехмерной (на примере шестого sigma-слоя) моделью значительно уменьшается, причем двумерная модель лучше коррелирует с верхним слоем, чем с глубинным.

В таблице 2 представлены необходимые временные затраты на проведение одного модельного расчета на установление. Включение спектрально-волнового модуля существенно увеличивает время выполнения расчета, а в совокупности с тем фактом, что поле течений формируется без существенного вклада этого модуля, рациональнее не использовать его.

Выводы

С точки зрения оценки способности лагунных водоемов к самоочищению, основной расчетной переменной является период обновления вод в водоеме, который в свою очередь зависит от структуры циркуляция и скоростей течений внутри водоема. Для эффективной оценки временных масштабов необходимо выбрать оптимальный метод расчета поля течений. В работе представлена методика, по которой сравнивались результаты расчетов в двумерной и трехмерной постановках для гидродинамического модуля при совместном использовании спектрально-волнового модуля. Трехмерная модель изначально обладает большей информативность из-за того, что предоставляет возможность проследить поле течений на различных глубинах.

Для проведенных расчетов влияние спектрально-волнового модуля на формирование поля течений оказывается минимальным. Коэффициент корреляции Пирсона между моделями со спектрально-волновым модулем и без него составляет порядка 0,96, что свидетельствует о высоком подобии полученных результатов. В то же время включение спектрально-волнового модуля в несколько раз увеличивает время расчета.

Разница между двумерным и трехмерным моделированием значимо проявляется при штормовых ветрах, порядка 20 м/с, а временные затраты на моделирования не так критичны. Таким образом, наиболее подходящей моделью для формирования поля течений является трехмерная модель только с гидродинамическим модулем. Эта модель информативна, применительно к штормовым ситуациям и оптимальна с точки зрения времени расчёта.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0012). Расчеты с применением спектрально-волнового модуля были поддержаны за счет гранта РФФИ 18-05-80035.

Литература

1. Модельный анализ полей течений и волнения в Вислинском заливе Балтийского моря / Б.В. Чубаренко [и др.] // Океанология. – 2012. – Т. 52, № 6. – С. 811–817.

2. Богданов, Н. А. Тенденции химического загрязнения и динамика Калининградского залива / Н.А. Богданов, А.А. Воронцов, Л.Н. Морозова // Водные ресурсы. – 2004. – Т. 31, № 5. – С. 576–590.

3. Modelling concept (Chapter 6). [In] Gonenc, I.E., Wolflin, J. (Eds.). Costal Lagoons: Ecosystem Processes and Modelling for Sustainable Use and Developments. / B.V. Chubarenko [et al.]; CRC Press (Boca Raton, London, New York, Washington D.C.). – 2004. – P. 231–306.

4. Climate Change in the Baltic Sea Region - a cross-country analysis of institutional stakeholder perceptions / J. Piwowarczyk [et al.]; AMBIO. – 2012. – No. 41. – P. 645–655.

2 2018.indd 124 04.07.2018 14:25:59

5. Impacts of potentional climate change on lagoons and their catchments. [In] Coastal Lagoons in Europe / C. Hesse [et al.] ; Edited by Ana I. Lillebo, Per Stalnacke and Geoffrey D. Gooch. – London: IWA Publishing Alliance House. – 2015. – P. 115–133.

6. Zimmerman, J. Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea, part1. Distribution of salinity and calculation of mixing time scales / J. Zimmerman // Netherlands Journal of Sea Research. – 1976. – Vol. 10. – P. 149–191.

7. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport timescales / N. Monsen [et al.] //Limnology and Oceanography. – 2002. – Vol. 47. – P. 1545–1553.

8. Hydrodynamics and spatial zonation of the Capo Peloro coastal system (Sicily) through 3-D numerical modeling / C. Ferrarin [et al.] // J. Mar. Syst. – 2013. – Vol. 117–118. – P. 96–107.

9. Takeoka, H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea / H. Takeoka // Continental Shelf Research. – 1984. – Vol. 3. – P. 311–326.

10. Hydraulic regime-based zonation scheme of the Curonian Lagoon / C. Ferrarin [et al.] // Hydrobiologia. – 2008. – Vol. 611. – P. 133–146.

11. Hydraulic zonation of the lagoons of Marano and Grado, Italy. A modelling approach / C. Ferrarin [et al.] // Estuar. Coast. Shelf Sci. – 2010. – Vol. 87. – P. 561–572.

12. Chubarenko, B. V. Comparison of Darss-Zingst Bodden Chain and Vistula Lagoon (Baltic Sea) in a view of hydrodynamic numerical modelling / B.V. Chubarenko, I.P. Chubarenko, H. Baudler // The Baltica. – 2005. – Vol. 18–2. – P. 56–67.

13. Seifert, T. A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea / T. Seifert, B. Kayser // Meeresw. Berichte (Marine Science Reports). – 1995. – No. 9. – P. 72–88.

14. Cieslinski, R. Water balance characteristics of the Vistula Lagoon coastal area along the southern Baltic Sea / R. Cieslinski, I. Chlost // Baltica. – 2017. – Vol. 30 (2). – P. 107–117.

15. Sokolov, A. N. Wind influence on the formation of nearshore currents in the Southern Baltic: numerical modelling results / A.N. Sokolov, B.V. Chubarenko // Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics. – 2012. – Vol. 59 (1–2). – P. 37–48

16. Dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone near the Vistula Lagoon inlet, south-eastern part of the Baltic Sea / V. Chechko [et al.] // Baltica. – 2015. – Vol. 28 (2). – P. 189–199.

17. Szymkiewicz, R. A. Mathematical Model of Storm Surge in the Vistula Lagoon, Poland / R.A. Szymkiewicz // Coastal Engineering. – 1992. – No. 16. – P. 181–203.

2 2018.indd 125 04.07.2018 14:25:59